

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Sledování vlivu vibrací na obráběcí proces

Monitoring the Impact of Vibrations on the Machining Process

Student:

Ondřej Pechál

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Pechál**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Sledování vlivu vibrací na obráběcí proces**
Monitoring the Impact of Vibrations on the Machining Process

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Zpracování naměřených hodnot.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
- [3] VLACH, B. a kol. *Technologie obrábění a montáží*. Praha : SNTL, 1990. ISBN 80-03-00143-09.
- [4] POPEOVÁ, V. *Monitorovanie opotrebenia rezných nástrojov*. Žilina : Vydavateľstvo ŽU EDIS Žilina, 2001. ISBN 80-7100-700-5.
- [5] ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha : Český normalizační institut, 1996. 32 s.

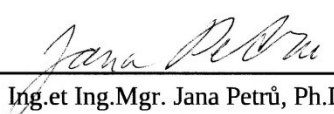
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19.5.2014.....

Ondřej Pechál.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5.2014

..... Ondřej Pechál

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Ondřej Pechál

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Pod Hájem 531

766 01 Valašské Klobouky

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PECHÁL, O. *Sledování vlivu vibrací na obráběcí proces: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 49s. Vedoucí práce: Ing. Jiří Kratochvíl, PhD.

Bakalářská práce pojednává o sledování vlivu vibrací na obráběcí proces. Chvění, které vzniká při obráběcím procesu, výrazně ovlivňuje jakost povrchu a rozměrovou přesnost obráběné součásti. Cílem práce je zjišťování a zpracování naměřených hodnot rychlostí vibrací v předem určených úsecích obráběné délky. V teoretické části jsou uvedeny základní definice a terminologie vibrodiagnostiky, popis měřicího zařízení pro záznam vibrací, použité stroje a umístění snímačů na stroji. Praktická část se zabývá zpracováním naměřených hodnot a následným sledováním, ve které části obráběné délky jsou vibrace největší.

Klíčová slova: vibrace, obráběcí proces, soustružení

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PECHÁL, O. *Monitoring the Impact of Vibrations on the Machining Process: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 49p. Thesis head: Ing. Jiří Kratochvíl, PhD.

The bachelor thesis is focused on a monitoring of the impact of vibration during the machining process. The tremble which occurs during the process significantly influences the quality of the surface and the dimension accuracy of the machining part. The aim of the thesis is to determine and to process the recorded values of the speed of vibration during its particular intervals of the machining process. In the theoretical part, the basic definitions and terminology of vibro-diagnostics, the description of measuring device for the record of the vibrations, the machinery used, and the location of probes of the machine are characterized. The practical part is focused on the processing of the results obtained and subsequently on the monitoring of the parts of the process when the vibration's values are excessive.

Keywords: vibration, turning, machining process

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří mému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D., za odbornou a pedagogickou pomoc a za cenné rady při společných odborných konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Blatovi, Ph.D. za půjčení měřicího zařízení a za odborné konzultace v oblasti vibrodiagnostiky. Poděkování patří mým spolužákům Jiřímu Morysovi, Jiřímu Skrálovi a Adamu Křivovi, kteří se společně podíleli na experimentu. Poděkovat bych chtěl také katedře obrábění a montáže, která mi umožnila provedení experimentu.

V Ostravě: 19.5.2014

..... Ondřej Peckál

podpis

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	- 9 -
ÚVOD	- 10 -
1 Teoretický rozbor	- 11 -
1.1 Základní definice a terminologie	- 11 -
1.2 Tuhost a chvění při obrábění	- 12 -
1.3 Mechanické kmitání	- 12 -
1.3.1 Periodické kmitání	- 13 -
1.3.2 Stacionární náhodné kmitání	- 14 -
1.3.3 Nestacionární náhodné kmitání	- 14 -
1.4 Fourierova transformace	- 14 -
1.4.1 Fourierovy řady	- 15 -
1.4.2 Fourierova transformace signálu	- 15 -
1.4.3 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)	- 15 -
1.4.4 Rychlá Fourierova transformace (FFT)	- 15 -
1.5 Vibrace s jedním stupněm volnosti	- 16 -
1.5.1 Volné kmitání	- 16 -
1.5.2 Vynucené kmitání	- 17 -
1.6 Samobuzené kmitání	- 17 -
1.6.1 Vznik samobuzeného kmitání	- 18 -
1.6.2 Regenerativní princip	- 19 -
1.6.3 Princip polohové vazby	- 19 -
1.6.4 Mezní křivky stability – „loby“	- 20 -
1.7 Tlumení vibrací	- 21 -
1.7.1 Viskózní tlumení	- 22 -
1.7.2 Coulombovo tlumení	- 22 -
1.7.3 Tuhé tlumení	- 23 -

1.8 Snímače vibrací	- 24 -
1.8.1 Akcelerometry	- 24 -
1.8.2 Snímač rychlosti	- 25 -
1.8.3 Bezdotyková sonda	- 26 -
1.9 Použité měřidlo ADASH A4400 – VA4 Pro	- 26 -
1.10 Použité snímače	- 28 -
1.11 Použitý stroj	- 29 -
1.12 Použitý nástroj	- 30 -
1.12.1 Břitová destička Kyocera – CERATIP KS6000	- 30 -
1.12.2 Držák destičky	- 31 -
1.13 Obráběný materiál	- 32 -
2 Provedení experimentu	- 33 -
2.1 Příprava experimentu	- 33 -
2.2 Realizace experimentu	- 34 -
2.3 Vyhodnocení naměřených hodnot	- 35 -
2.4 První část experimentu	- 36 -
2.5 Druhá část experimentu	- 40 -
2.6 Třetí část experimentu	- 41 -
3 Závěr	- 42 -
4 Seznam použité literatury	- 43 -
5 Seznam příloh	- 45 -

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
DFT	[-]	Diskrétní Fourierova Transformace
FFT	[-]	Rychlá Fourierova Transformace
F_n	[N]	normálová složka síly
F_y	[N]	radiální složka řezné síly
R_m	[MPa]	pevnost v tahu
T	[s]	perioda
VB	[mm]	opotřebení hřbetu nástroje
a_p	[mm]	hloubka řezu
b	[mm]	šířka třísky
c	[kg/s]	tlumící efekt
f	[Hz]	frekvence
f_p	[mm]	posuv
k	[N/m]	tuhost
m	[kg]	hmotnost
n	[1/ot]	otáčky
s	[mm]	posuv
t	[s]	čas
v	[m/s]	rychlost
v_c	[m/min]	řezná rychlost
\dot{x}	[m/s]	rychlost tělesa
\ddot{x}	[m/s ²]	zrychlení tělesa
X_e	[-]	komplexní koeficient
y	[-]	tuhost soustavy
μ	[-]	kinetický koeficient
ω	[rad.s ⁻¹]	kruhová frekvence
Ω	[Hz]	vlastní úhlová frekvence

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá problematikou vibrací při soustružení. Soustružení v této době je jeden z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších typů obrábění, při kterém se odebírá tříska pomocí řezného nástroje s přesně definovanou geometrií. Při obrábění na obráběcí proces působí mnoho negativních vlivů, které mohou mít za důsledek např. zhoršení kvality a stability procesu, nebo přesnost obrobku. Mezi tyto důsledky výrazně patří také vibrace, které způsobují zejména špatnou kvalitu obráběné plochy, ale zároveň zásadním způsobem ovlivňují trvanlivost řezného nástroje. Vibrace vznikají několika způsoby, které jsou popsány níže v práci.

V této bakalářské práci je nejdříve popsána teorie a základní pojmy vibrodiagnostiky. Pojednává také o teorii a způsobu měření vibrací, o obráběném materiálu a o použitém stroji, nástroji a také o použitém řezném materiálu. Praktická část se zabývá vyhodnocením a zpracováním naměřených hodnot vibrací a jejich následném porovnání s různými hodnotami řezných rychlostí ve třech odlišných směrech.

Zařízení, kterým je možno sledovat a zaznamenávat hodnoty vibrací, z důvodu velmi velké finanční náročnosti, nevlastní katedra obrábění a montáže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Proto byla oslovena katedra výrobních strojů a zařízení na zapůjčení speciálního přístroje AdashA4400 – VA4 Pro, díky kterému bylo možné provést experiment. Experiment se prováděl v laboratoři katedry obrábění a montáže, na hrotovém soustruhu.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 Základní definice a terminologie

Diagnóza – analýza stavu objektu tj. vyhodnocení zda je daný objekt provozuschopný za daných podmínek. Základní úkoly diagnózy jsou:

Detekce – zjišťování existence poruchy

Lokalizace – určení konkrétního místa, části nebo uzlu, kde vznikla nebo vzniká porucha

Specifikace – určení příčiny poruchy diagnostického signálu

Predikace – určení doby zbytkové činnosti tzn. určení času, kdy bude možné stroj dále používat, než bude muset stroj projít opravou

Diagnostický systém – systém, který vyhodnocuje stav objektu a je tvořen:

Diagnostickými prostředky – soubory zařízení, postupy, a metody pro sledování a vyhodnocení aktuálního technického stavu stroje

Diagnostickým objektem a obsluhou

ONLINE systémy jsou systémy, které jsou instalovány trvale na jednotlivém stroji. Opakem jsou systémy přenosné a ty se nazývají OFFLINE systémy. Jednou z dalších variant je kombinace těchto systémů: snímače jsou instalovány trvale na stroji, ale měření dat probíhá cyklicky. Poté hovoříme o systémech SEMITRVALÝCH

Technický stav – je posuzován pomocí velikosti a vývoji diagnostické veličiny a dalších vlastností, včetně technických parametrů

Diagnostická veličina – existují dva druhy (fyzikální a funkční), které obsahují informace ohledně stavu stroje nebo objektu

Provozuschopnost – stav, kdy stroj dokáže fungovat a vykonávat určené funkce aniž by došlo ke zhoršení kvality výrobku

Porucha – jev, při kterém se ukončuje provozuschopnost stroje, a dále stroj není schopen vykonávat určenou funkci za daných podmínek [2]

1.2 Tuhost a chvění při obrábění

Tuhost technologické soustavy – stroj, nástroj, přípravek, obrobek – výrazně ovlivňuje jakost obrobených ploch, ale hlavně ovlivňuje celou stabilitu procesu řezání. Tuhostí této soustavy lze také rozumět jako odolnost proti pružným deformacím a většinou se vztahují k deformacím v radiálním směru složkou řezné síly F_y . Ovšem na výslednou tuhost technologické soustavy se podílí větší počet členů s deformací y_1, y_2, \dots, y_k , poté je výsledná deformace

$$y = \sum_{i=1}^k y_i \quad (1.1)$$

kde „k“ znamená počet členů jednotlivé soustavy. Za předpokladu, že v dané situaci působí na technologickou soustavu řezné síly F_y , můžeme dále napsat

$$\frac{y}{F_y} = \frac{y_1}{F_y} + \frac{y_2}{F_y} + \dots \frac{y_k}{F_y} \quad (1.2)$$

Počet jednotlivých členů soustavy, které zásadním vlivem ovlivňují výslednou tuhost soustavy, se může v jednotlivých případech výrazně lišit. [1]

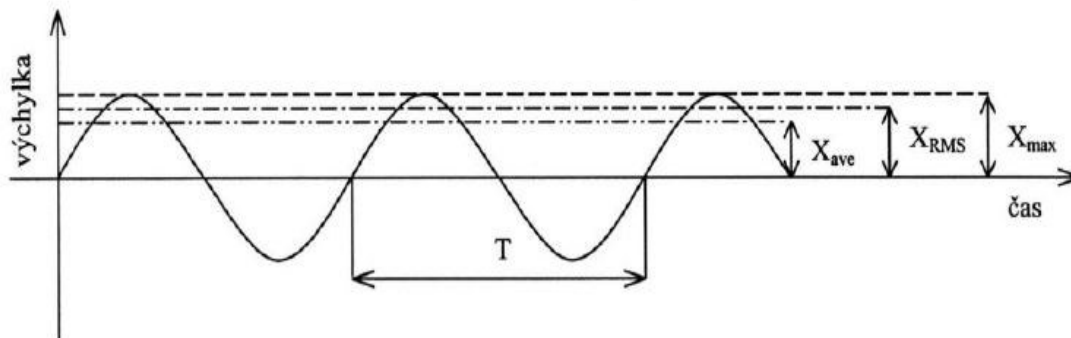
Obecně platí, že malá celková tuhost technologické soustavy bývá většinou prvním signálem ke vzniku kmitání. Kmitání poté působí negativně hlavně na kvalitativní parametry a na ekonomiku řezného procesu. V oblasti kmitání při procesu řezání není možno využít plného výkonu stroje a řezivosti nástroje, výrazně se zhoršuje drsnost obrobené plochy a s tím související zhoršení tvarové a rozměrové přesnosti obrobené plochy. Při vzniku velkého kmitání může dojít také k mechanickému porušení nástroje, popřípadě některé ze součástí stroje. [1]

1.3 Mechanické kmitání

Mechanické kmitání je ve své podstatě typ mechanického pohybu hmotného bodu. Tento bod koná pohyb v omezené oblasti v blízkosti rovnovážné polohy. Rovnovážná poloha je místo, v kterém na daný hmotný bod nepůsobí žádná síla.

1.3.1 Periodické kmitání

Při periodickém kmitání se opakuje totožný časový průběh ve stejné době (periodě).
Názorným příkladem, kdy se časový průběh opakuje je harmonické kmitání, Obr 1. [2]



Obr. 1: Harmonické kmitání [2]

Frekvence kmitání

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$

nebo také

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.4)$$

Rychlost:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot x_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (1.5)$$

Zrychlení:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot X_{\max} \cdot \sin(\omega t) = -A_{\max} \cdot \sin(\omega t) = A_{\max} \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad (1.6)$$

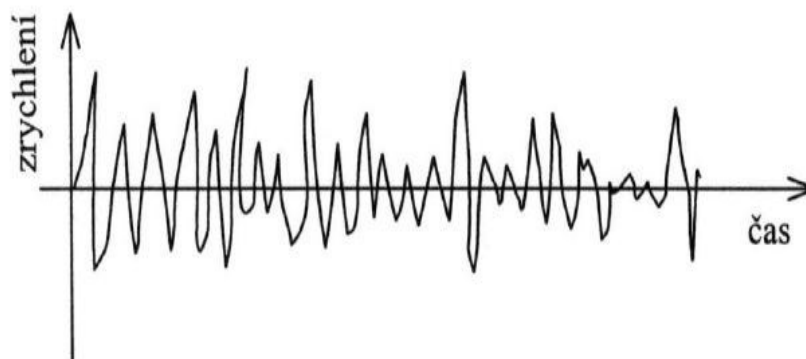
kde A_{\max} ...max. zrychlení = amplituda zrychlení

V_{\max} ...max. rychlost = amplituda rychlosti

t ... čas

1.3.2 Stacionární náhodné kmitání

Stacionární kmitání je specifické tím, že časový průběh se nikdy přesně neopakuje, viz Obr. 2. U deterministických procesů lze většinou předem určit průběhy sledovaných veličin, jako jsou zrychlení, rychlosti nebo výchylky v časovém okamžiku, kdežto u stacionárních procesů to není možno. Využívá se zde poznatků ze statistiky ve spojení s harmonickou analýzou. [2]



Obr. 2: Příklad stacionárního signálu [2]

1.3.3 Nestacionární náhodné kmitání

Za nestacionární kmitání můžeme definovat takové kmitání, jehož statistické vlastnosti se mění s časovým průběhem. Téměř většina druhů kmitání, se kterými se můžeme setkat v praxi, jsou nestacionární, neboť právě statistické vlastnosti se mění s časem. V mnoha případech ovšem můžeme kmitání považovat za stacionární, z důvodu, že změny statistických vlastností mohou být změněny pomalu, nebo mohou mít stacionární charakter. K analýze silně nestacionárního kmitání se musí provádět speciální metody, jejichž princip je průměrování. [2]

1.4 Fourierova transformace

Průběh signálu je většinou znázorňován v časové oblasti. Vlastnosti, které se prezentují rozkladem na soubor elementárních funkcí, vhodně doplňují posuzování časového průběhu signálu. Jeden z nejpoužívanějších způsobů rozkladu se používá rozklad na soubor harmonických funkcí. Ty se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Fourierovou řadou se rozumí rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů. [8]

1.4.1 Fourierovy řady

Periodická funkce se dá charakterizovat jako rovnost posunutých funkčních hodnot

$$x(t) = x(t + iT) \quad (1.7)$$

kde T znamená periodu a $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ násobek.

1.4.2 Fourierova transformace signálu

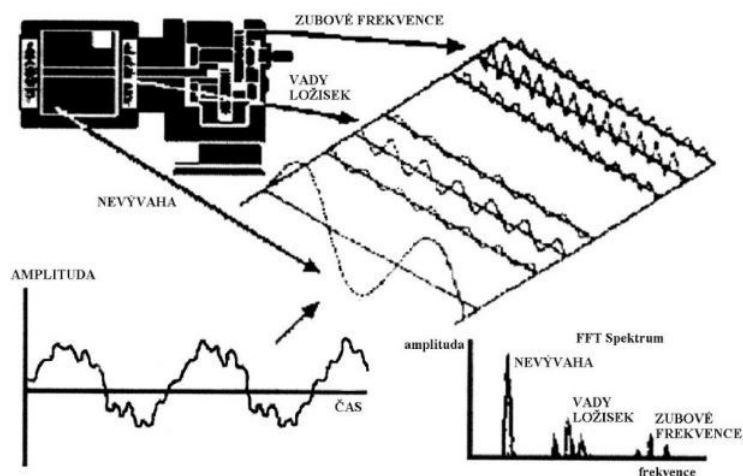
Pomocí Fourierovy transformace lze vypočítat rozklad obecného signálu na harmonické složky. Nejedná se o rozklad pouze periodického signálu, ale také o rozklad signálu neperiodického. Jako příklad neperiodického signálu můžeme uvést např. osamocený obdélníkový impuls či jakákoliv jiná neperiodická funkce. [8]

1.4.3 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

DFT je aproximací Fourierovy transformace. Přesnost aproximace výrazně závisí s časovým tvarem (průběhem) aproximované funkce vlivem vzorkování a omezování. Je nutné, aby se DFT co nejvíce přiblížila spojitě Fourierově analýze. [8]

1.4.4 Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Největší výhodou FFT oproti DFT je jak už vypovídá z názvu jeho rychlost. Rozklad FFT se týká většinou hlavně periodických signálů. Počet složek rozkladu je nekonečně mnoho, ale přesto tento rozklad obsahuje pouze složky s frekvencemi, které jsou násobky harmonické. Spektrum tudíž obsahuje pouze izolované složky. [2]



Obr. 3: Princip FFT [2]

1.5 Vibrace s jedním stupněm volnosti

Pro popis vibrací s jedním stupněm volnosti je většinou vybrán obecný řezný nástroj, většinou s jedním nebo více břity, který je připojen k nožové hlavě soustruhu, nebo k nástrojovému držáku frézky. Tyto dva názorné způsoby jsou nazývány jako sdružená tělesa. Vibrace těles, které vykazují především vlastnosti, jako jsou elasticita nebo schopnosti deformace bez trvalé změny tvaru, se mohou dále rozdělovat do tří kategorií: volné, vynucené a vlastní buzené vibrace. [3]

1.5.1 Volné kmitání

Volné kmitání soustavy vzniká, například je-li soustava výrazně vychýlena z rovnovážné polohy. Je sama sobě volná a nepůsobí na ni žádné účinky vnějších sil. Od toho je také odvozen termín volné kmitání. [3]

Homogenní pohybová rovnice pro tlumenou soustavu s jedním stupněm volnosti

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0 \quad (1.8)$$

Rovnice se obvykle upravuje do tvaru

$$\ddot{x} + 2b_p \Omega \dot{x} + \Omega^2 x = 0 \quad (1.9)$$

,kde b_p značí poměrný útlum a Ω vlastní úhlovou frekvenci netlumené soustavy

$$b_p = \frac{b}{2m\Omega} \quad (1.10)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.11)$$

Pohybová rovnice pro tlumenou soustavu s jedním stupněm volnosti

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1.12)$$

Úhlová frekvence volného kmitání

$$f = \frac{\Omega}{2\pi} \quad (1.13)$$

1.5.2 Vynucené kmitání

Vynucené kmitání vzniká proměnlivými silami, které periodicky působí na jednotlivé prvky obráběcího systému. [4]

Pohybová rovnice pro výchylku $x(t)$

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F(t) \quad (1.14)$$

kde „ b “ je konstanta úměrnosti. Tlumením uvažujeme úměrné rychlosti $x(t)$. Tlumící síla se značí pomocí členu „ $b\dot{x}$ “, který vystihuje s určitou přesností tlumící účinek oleje. Existuje i mnoho dalších typů tlumení, které ovšem nejdou analyticky vyjádřit pomocí lineárního členu. [3]

V obráběcím systému jsou hlavní příčiny vzniku vynuceného kmitání zejména: [3]

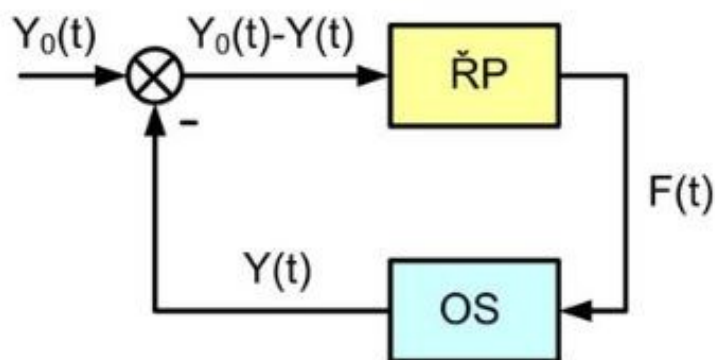
- silové pulzy v systému
 - nevyvážené rotující části např. vřeteno, obrobek, nástroj a také další otáčející se části obráběcího stroje
 - hmoty, které konají přímočarý vratné pohyby např. obrobek, nástroj nebo další části obráběcího stroje
- přerušovaný řez
 - měnící se průřez třísky
 - nesouvislé řezné procesy např. hoblování nebo obrážení

1.6 Samobuzené kmitání

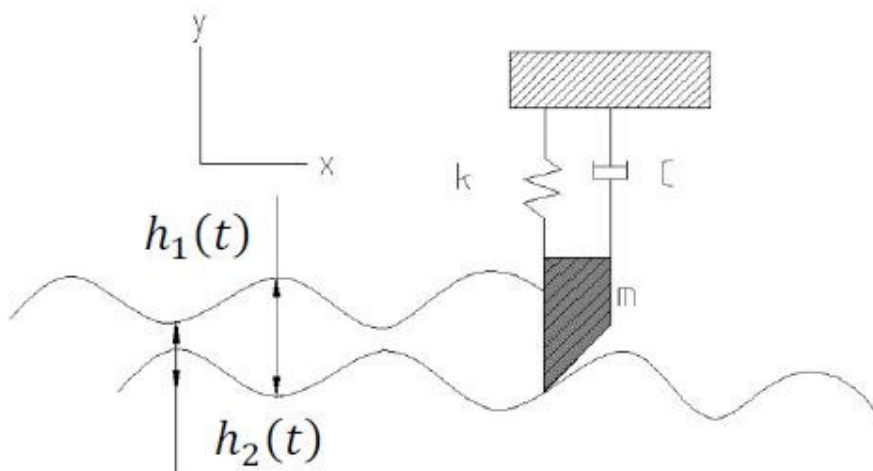
Teorie ohledně samobuzeného kmitání umožňuje sestavit diagram stability, s jehož pomocí se dá dosáhnout maximálního výkonu stroje, resp. vřetena stroje. Proto je to jeden z nejdůležitějších faktorů pro konstrukci strojů a pro vývoj stroje. Diagram stability obsahuje mezní křivky stability, které se také nazývají „loby“, sloužící k rozdělení oblastí stabilních a nestabilních řezných podmínek. Diagram stability znázorňuje závislosti šířky třísky na otáčkách vřetene. Jakmile je šířka třísky rovna mezní třísce, je proces na mezi stability, a tudíž chvění nenarůstá. Pokud jsou ovšem řezné podmínky zvoleny v oblasti nad křivkou, proces se stává nestabilním a dochází ke vzniku samobuzeného kmitání, jehož následky mohou vést k poškození nástroje, nebo dokonce celého stroje. [5]

1.6.1 Vznik samobuzeného kmitání

Samobuzené kmitání se může objevit při hrubování a také při obrábění na čisto. Při přesném obrábění má potlačení kmitání zásadní význam pro přesnost obrobku, kvalitu obrobené plochy a pro životnost nástroje. [6] Chvění je závislé na vzájemném ovlivňování obráběcího stroje společně s řezným procesem, což je možné názorně zobrazit na zpětnovazebním obvodu, viz obr. 4. Proměnným průřezem, resp. změnou hloubky třísky, se zajišťuje modulace statické řezné síly, což způsobuje chvění (viz Obr 5). V důsledku kmitání systému stroj-nástroj-obrobek dochází ke změně relativní polohy nástroje k obrobku a to má za příčinu změnu hloubky třísky, tudíž řezný proces je hlavním zdrojem vnitřního buzení systému. Samobuzené kmitání vznikne za podmínky existence modulované řezné síly, resp. existence proměnné hloubky třísky, u které je typické, že vzniká ihned po překročení mezní šířky b , která je totožná s axiální hloubkou třísky a_p . Samobuzené kmitání při obrábění vzniká pomocí dvou základních principů. [5]



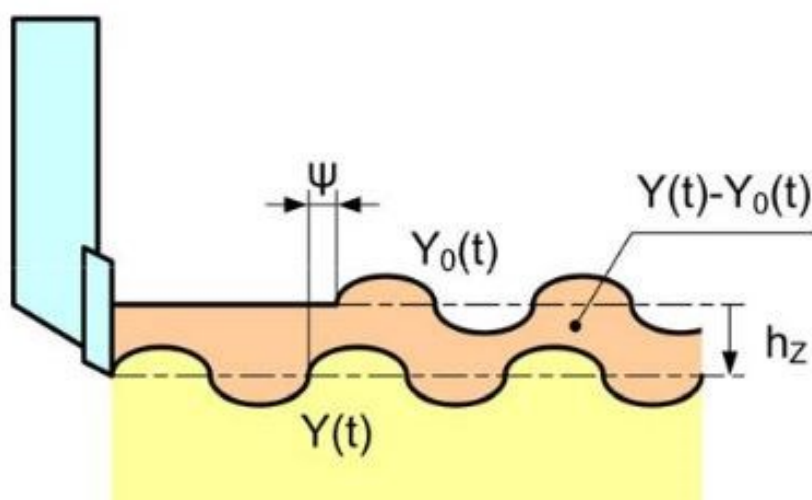
Obr. 4: Zpětnovazební obvod [5]



Obr. 5: Proměnlivá tloušťka třísky [7]

1.6.2 Regenerativní princip

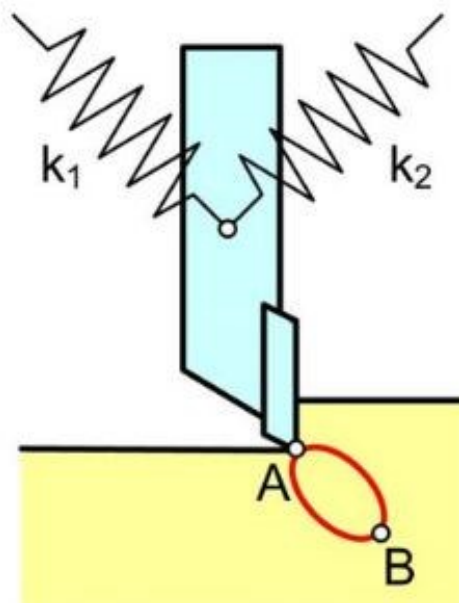
Samobuzené kmity nejčastěji vznikají podle regenerativního principu tak, že kmitající břit nástroje $Y(t)$ obrábí zvlněný povrch $Y_0(t)$, který vznikl při předchozím obráběcím procesu (Obr. 6). Zvlněný povrch obrobku mění průřez třísky a tím se moduluje řezná síla, která je zdrojem buzení systému. Při každé otáčce vřetene resp. při každém řezu se vlny neustále regenerují. Podle regenerativního principu je pro samotné tvoření samobuzených kmitů rozhodující, tzv. určitý fázový posun mezi před obrobeným povrchem a kmitajícím nástrojem. Z toho vyplývá, že pokud by byl fázový posun nulový, neměnil by se průřez třísky, řezná síla by nebyla modulována, a tudíž by se samobuzení kmitání neobjevilo. [5]



Obr. 6: Regenerativní princip [5]

1.6.3 Princip polohové vazby

Pro vznik samobuzených kmitů je podle principu polohové vazby nutná existence dvou dominantních tvarů kmitů, které působí mezi nástrojem a obrobkem. Tyto kmity mají dvě odlišné frekvence a jsou sobě navzájem kolmé. Řezná síla současně v obou směrech rozkmitá systém o stejné frekvenci a stejnou vzájemnou fází tak, že břit se pohybuje po tzv. eliptické dráze. Princip a eliptická dráha břitu nástroje jsou zobrazeny na obr. 7.

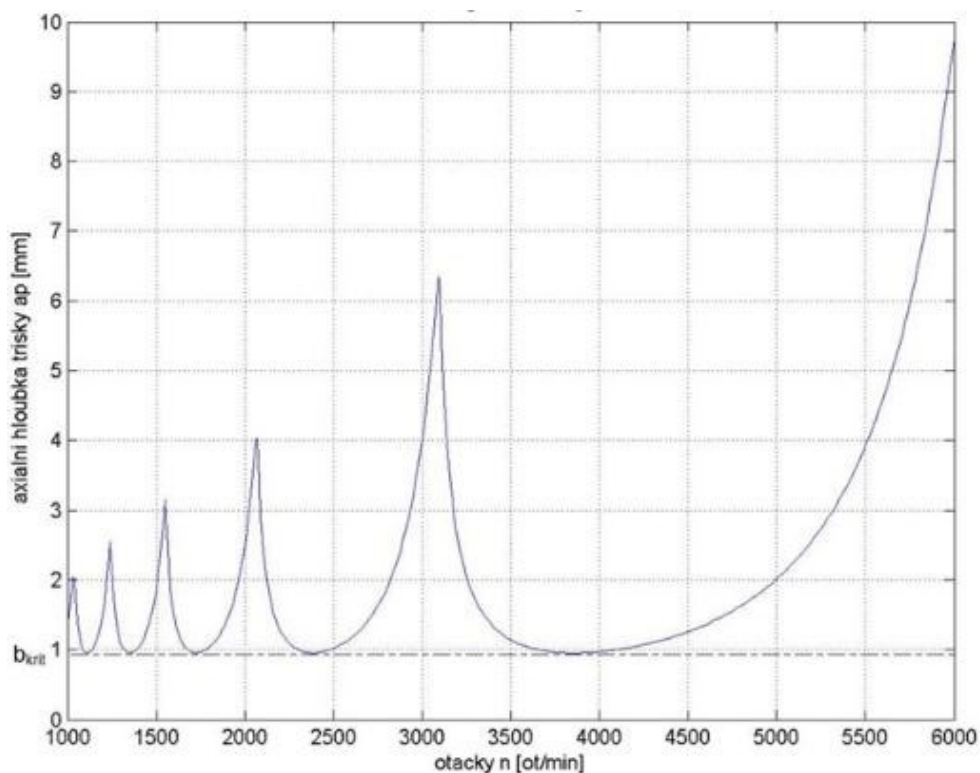


Obr. 7: Princip polohové vazby [5]

Pokud se břit pohybuje ve směru hodinových ručiček a po dráze z bodu A do bodu B, působí řezná síla proti směru pohybu a ze systému odebírá energii. Naopak při opačném pohybu z bodu B do bodu A působí řezná síla ve směru pohybu a dodává energii do systému. Dle Obr. 7 je zřejmé, že při obrábění na dráze BA se obrábí ve větší hloubce (větší řezná síla) než je tomu na dráze AB, dodávaná energie do systému převažuje. Pokud dojde k situaci, kdy se dodávaná energie nestačí zpracovat tlumením, poté dochází k nárůstu amplitud kmitů a řezný proces začíná přecházet v proces nestabilní. Tímto způsobem může dojít ke vzniku samobuzeného kmitání nezvládnutého povrchu např. při obrábění hladkého povrchu, při prvním řezu, nebo také například při obrábění závitů. Pro vznik chvění je rozhodující směrová orientace mezi řeznou silou a kmitavým systémem stroje. [5] [7]

1.6.4 Mezní křivky stability – „loby“

Mezní křivky stability názorně znázorňují závislost mezní šířky třísky na otáčky vřetene (Obr. 8). Po složení jednotlivých lobů získáme praktický diagram stability, ze kterého dále můžeme určit optimální řezné podmínky (otáčky n a hloubku třísky a_p). Jakmile je hodnota třísky menší než hodnota mezní, dostáváme se do oblasti pod křivkami a získáme proces stabilní. Naopak v oblasti nad křivkami je oblast nestabilních řezných podmínek a vzniká samobuzené chvění. [5]



Obr. 8: Diagram stability [5]

Diagram tedy umožňuje např. nastavit optimální řezné podmínky, aby se zamezilo v celém rozsahu otáček zamezit vzniku chvění. Proto volíme šířku třísky menší než je hodnota kritické mezní třísky. Dále lze pomocí diagramu stability stanovit nastavení vyšších úběrů pro hrubování nastavením vhodné oblasti otáček, při které je možno odebírat větší šířku třísky než je kritická hodnota. Po nastavení optimálních řezných podmínek, kdy se odebírá maximální šířka třísky, je maximalizován výrobní výkon stroje. V případě kdy se zaznamenají vibrace, diagram může napovědět, v jakém rozsahu je vhodné zvýšit nebo snížit otáčky k odstranění chvění, popřípadě jak snížit šířku třísky.

1.7 Tlumení vibrací

Tlumením v obráběcím procesu se odkazuje na „únik“ vstupní energie do vibračního systému. V praxi to znamená, že ne všechny energie, které vstupují, způsobují pohyb. Většina energií se ale většinou rozptýlí jiným způsobem. Existuje všeobecný model tlumení vibrací, který je ovšem velmi složitý a nějak zvlášť se nehodí k jednoduchému matematickému popisu jednoho stupně volnosti. Obvykle se z tohoto důvodu používá jeden nebo více matematicky jednoduchých, ale i přesto účinných, modelů tlumení. [9]

1.7.1 Viskózní tlumení

Tlumicí síla, je úměrná rychlosti hmoty, která je v pohybu. Jako příklad tohoto jevu můžeme uvést pokus protlačit tělo tekutinou, máchání rukou skrz vodu, nebo také vystrčení ruky z okna pohybujícího se vozidla. Pokud se zvýší rychlost pohybu ruky např. s chováním tekutiny tak se odpor přímo úměrně zvedne za předpokladu, že tlumicí síla bude zapsána jako:

$$f = c\dot{x} \quad (1.15)$$

rychlost bude nahrazena:

$$\dot{x} = sXe^{st} = i\omega Xe^{st} \quad (1.16)$$

z vzorce (1.16) je zřejmé, že viskózní tlumení je frekvenčně závislé. Pokud dochází ke kreslení modelu tlumení, tlumicí prvek se často znázorňuje jako kapalný tlumič, který je velmi podobný tlumiči auta.

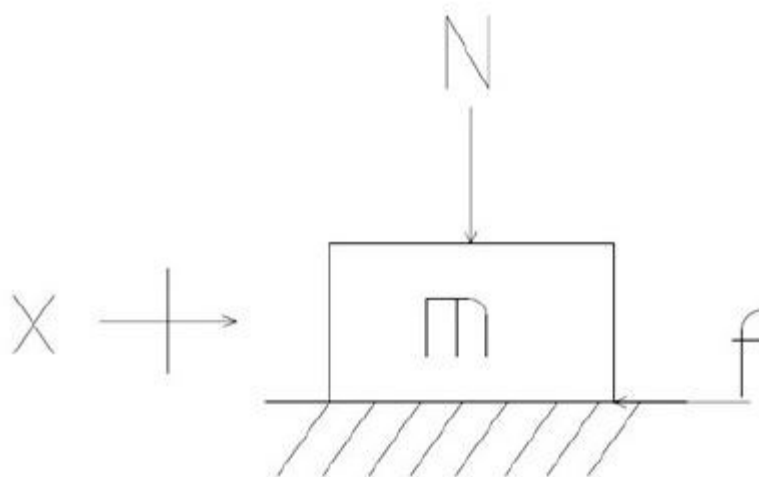
Jako praktický příklad viskózního tlumení můžeme uvést chování auta. V autě tělo dodává hmotnost, pružiny jsou nainstalovány k poskytnutí tuhosti soustavy a tlumiče zajišťují tlumení. Tlumič funguje na principu pohybující se desky s otvory přes tekutinu a tím se vytváří síla úměrná rychlosti pohybu. [9]

1.7.2 Coulombovo tlumení

Coulombovo tlumení je jeden z dalších velmi účinných způsobů tlumení vibrací. V tomto případě tlumení je energie rozptylována působením relativního pohybu mezi dvěma dotýkajícími se povrchy. Z důvodu, že třecí síla působí vždy proti směru pohybu, výsledná rovnice bude nelineární. Definice Coulombovy tlumicí síly je:

$$f = \begin{cases} -\mu F_n & \dot{x} > 0 \\ 0 & \dot{x} = 0 \\ \mu F_n & \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (1.17)$$

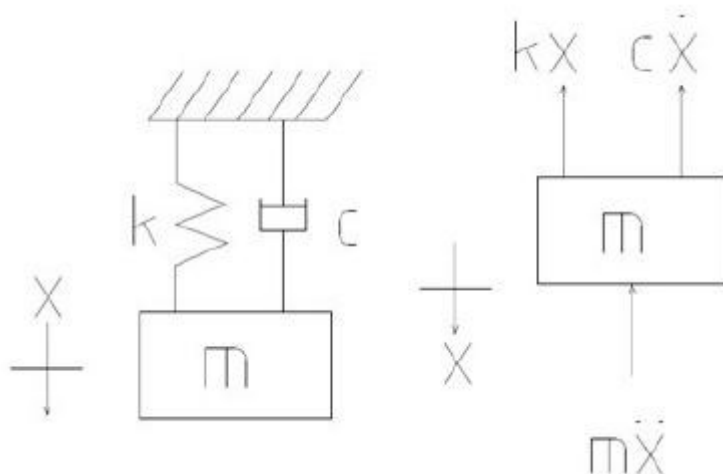
Coulombovo tlumení je odpovědné za absorbování energie třením mezi dvěma objekty. Např. u auta se využívá Coulombovo tlumení při brzdění v autě, kdy dochází k přeměně kinetické energie rotujícího kola na teplo. Stejně jako u viskózního tlumení, tlumicí síla jde vždy proti směru pohybu, ovšem místo toho, aby byla přímo úměrná rychlosti, je přímo úměrná normálové síle. [9]



Obr. 9: Coulombovo tlumení [9]

1.7.3 Tuhé tlumení

I bez přítomnosti vnějšího tekutého prostředí nebo tření mezi povrchy, se pohyb kmitů časem rozkládá a to je účinek pohlcování energie dovnitř tělesa. Pohlcování energie u pevného nebo strukturálního tlumení je přímo úměrné druhé mocnině amplitudy vibrací.



Obr. 10: Sestava pružina-závaží-tlumič [9]

1.8 Snímače vibrací

Při měření vibrací se snažíme, aby výstupní signál odpovídal co nejvěrněji průběhu kmitání. Všeobecně se dá říci, že v podstatě existují dva základní typy snímačů pro zachycení vibračního stavu

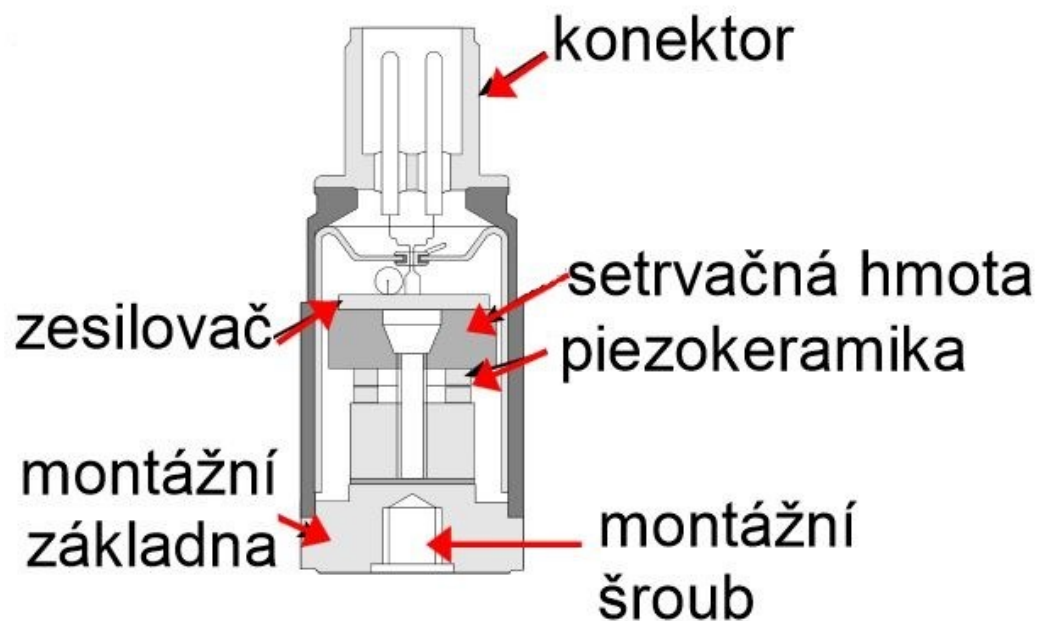
- Seismická zařízení, která jsou instalována na konstrukci stroje. Výstupní hodnotou je míra absolutních vibrací konstrukce.
- Snímače relativní výchylky, které měří střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy.

Existuje i řada dalších měření na strojích, kde jsou vyžadovány další typy snímačů, jako jsou tenzometry. Ovšem jejich použití pro monitorování vibračního stavu je méně obvyklé. Výběr používaných snímačů záleží hlavně na dané aplikaci, tzn. na veličině, kterou chceme měřit (výchylka, zrychlení, rychlost), zda měříme absolutní nebo relativní vibrace (jako příklad relativních vibrací můžeme uvést vibrace vůči ložiskovému domku). Dále záleží, zda provádíme měření nízkofrekvenčních, či běžných frekvenčních vibrací. Snímače pro monitorování stavu vibrací tedy jsou: [2]

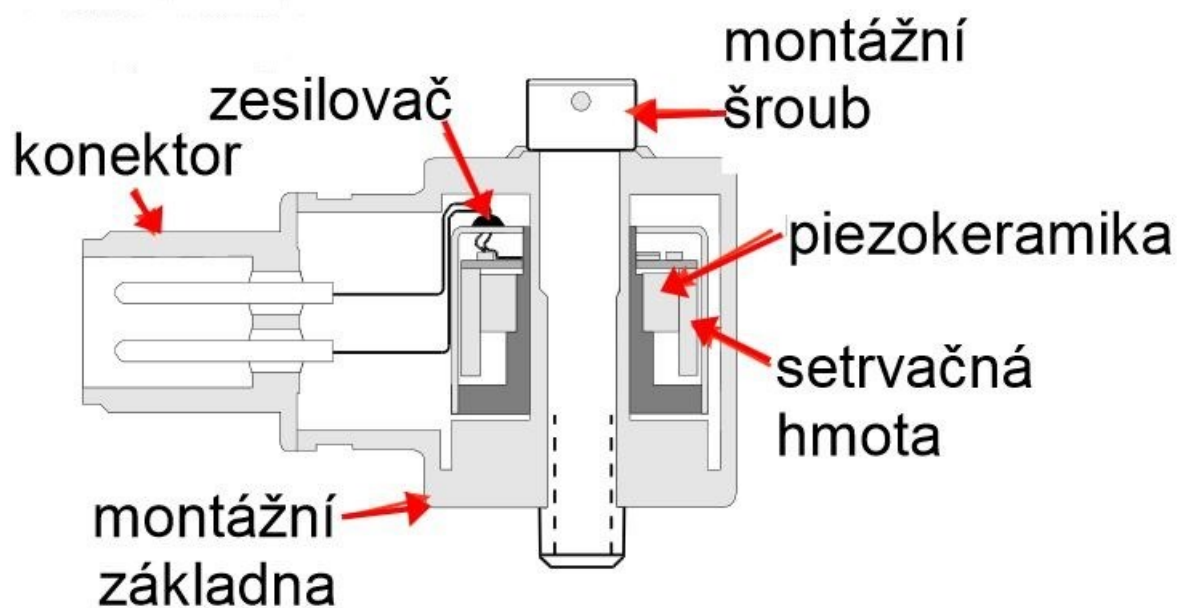
1.8.1 Akcelerometry

Výhodou akcelerometrů je, že jejich signál se může dále zpracovávat tak, aby udával libovolnou veličinu (zrychlení, rychlost a také výchylku vibrací). Akcelerometr je seismické zařízení, jehož výstupní signál se generuje úměrně mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Akcelerometry se většinou montují na nerotující konstrukce stroje. Akcelerometry se dají sehnat s mnoha různými montážními rezonančními frekvencemi, většinou od 1kHz výše. Doporučuje se, aby lineární rozsah akcelerometru pokrýval rozsah sledované frekvence. Obvykle se integruje výstup tak, aby určoval signál úměrný rychlosti.

Akcelerometry jsou v různých velikostech a jejich charakteristickým znakem je velký dynamický rozsah a široký frekvenční rozsah. Většinou se používají v aplikacích s malými objekty s malou montážní plochou, v prostředí při vysokých teplotách, nebo v silných magnetických polích. Typickým znakem akcelerometru je, že obsahuje jeden nebo několik piezoelektrických krystalových elementů. Piezoelektrický krystal generuje elektrický náboj. Podle umístění krystalu, a umístění hmoty ve snímači rozeznáváme dva druhy akcelerometrů, tlakový a smykový. [2]



Obr. 11: Tlakový akcelerometr [10]



Obr. 12: Smykový akcelerometr [10]

1.8.2 Snímač rychlosti

Výstup snímače rychlosti lze integrovat na výchylku vibrací. Snímač rychlosti je seismické zařízení, které vytváří napěťový signál, který je přímo úměrný mechanické vibrační rychlosti tělesa. Většinou se snímače umísťují na nerotující konstrukci stroje.[2]

1.8.3 Bezdotyková sonda

Výstup je úměrný výchylce vibrací mezi rotujícími elementy a elementy stroje v klidu. U rotujících strojů velkých rozměrů, jako jsou např. velké turbínové stroje, a u strojů s velkou hmotností nosné konstrukce ve srovnání s hmotností rotoru, může být nezbytné měřit výchylku mezi rotorem a konstrukcí statoru. Snímač výchylky je zařízení, které dokáže ověřit vibrační výchylku hřídele v pohybu vůči stacionárnímu ložisku, nebo také části skříně stroje. [2]

1.9 Použité měřidlo ADASH A4400 – VA4 Pro

Přístroj A4400 – VA4 Pro patří mezi špičkové přístroje pro realizaci měření v oblasti vibrační diagnostiky strojů. Přístroj obsahuje základní moduly analyzátoru, datakolektoru, rekordér naměřených signálů, moduly pro provozní vyvažování strojů, měření rozběhů a doběhů, akustická měření a mnoho dalších. Poslední verze přístroje již také obsahují zcela unikátní expertní systém, jehož vývoj má na starosti firma Adash, který slouží pro automatickou detekci poruch strojů.

Přístroj je převážně určen pro pracovníky, kteří se zabývají problematikou diagnostiky stroje, provozním vyvažováním a pro servisní nebo inspekční činnost. [11]



Obr. 13: Přístroj A4400 – VA4 Pro [11]

Tab. 1: Technické parametry A4400 VA4 Pro [11]

Vstupní kanály:	<ul style="list-style-type: none"> - 4 AC s možností ICP napájení - 4 DC kanály pro procesní veličiny - 1 TACHO pro externí spouštění
Vstupní rozsahy:	<ul style="list-style-type: none"> - AC +/- 12 V peak - peak - DC +/- 24 V
AD převodník:	- 24 bit, 64 bit zpracování signálu
Vzorkovací frekvence:	<ul style="list-style-type: none"> - max. 196 kHz pro 1 kanál - max. 64 kHz současně pro 4 kanály - min. 64 Hz
Synchronizace	- plně synchronní měření na 4 kanálech
Rozsah FFT:	<ul style="list-style-type: none"> - min. 100 čar - max. 25 600 čar
Režimy měření:	<ul style="list-style-type: none"> - Datakolektor, pochůzková měření - Analyzátor – analytická měření - Balancer – provozní vyvažování strojů - RunUp – měření rozběhů a doběhů - Recorder – záznam signálů
Procesor:	- Intel Atom 1,6 GHz
Paměť pro data:	- Až 120 GB
Zpracování dat:	<ul style="list-style-type: none"> - FFT analýza v reálném čase - ENVELOPE – obálková analýza - ACMT – analýza stavu pomaloběžných ložisek - Řádová analýza - Měření v uživatelských pásmech - Měření otáček
Displej:	- Barevný 800 x 600, LCD
Komunikační rozhraní:	- USB, Ethernet
Teplotní rozsah, napájení:	- -10 °C až +50°C, akumulátor pro 6 hodin provozu, AC 230 V
Rozměry a hmotnost:	- 230 x 140 x 60 mm, 2000 g

1.10 Použité snímače

Pro realizaci experimentu byly použity tři akcelerometry: pro pohyb ve směru posuvu, pro pohyb ve směru zadní roviny a ve směru hlavního řezného pohybu. Pro snímání ve směru posuvu a směru zadní roviny byly použity snímače typu AC 102 a ve směru zadní roviny snímač typu AC 104.



Obr. 14: Akcelerometr typu AC 102 [12]



Obr. 15: Akcelerometr typu AC 104 [12]

Tyto snímače jsou zejména aplikovány pro následující aplikace v mnoho průmyslových odvětvích:

- ventilátory a vzduchotechnika
- vřetena
- čerpadla a kompresory
- motory a převodovky aj.

1.11 Použitý stroj

Experiment se prováděl v laboratoři VŠB - TUO na univerzálním hrotovém soustruhu MAŠSTROJ Trojan typu CV11MV. Soustruh pochází od bulharského výrobce a tento stroj vlastní Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, jmenovitě katedra obrábění a montáže.



Obr. 16: Univerzální soustruh CV11MV [13]

Základní parametry a další informace o použitém stroji jsou uvedeny v tabulce 2. Použitý soustruh je také vybaven frekvenčním měničem.

Tab. 2: Parametry soustruhu CV11MV [13]

parametr stroje	hodnota
Průměr nad ložem	500 mm
Průměr nad supportem	290 mm
Točná délka	1100 mm
Průměr sklíčidla	250/315 mm
Příkon elektromotoru	15 kW

1.12 Použitý nástroj

Při provádění experimentu byly použity vyměnitelné břitové destičky typu Kyocera-CERATIP KS6000. Tento druh břitové destičky byl vybrán k experimentu mimo jiné také proto, že je vhodným typem pro sledování ostatních dějů při obráběcím procesu. Břitová destička byla upnuta do nožového držáku značky CERADDEX.

1.12.1 Břitová destička Kyocera – CERATIP KS6000.

Tento typ břitové destičky je vyroben z křemíko-nitridové keramiky, na jejímž povrchu je nanесena odporová vrstva, která je ideální k měření tepelného odporu.



Obr. 17: CERATIP KS6000 [13]


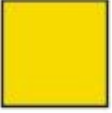


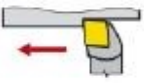



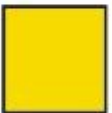

Skupina K řezných materiálů dle normy ISO 513 je vhodná pro obrábění materiálů především s krátkou drobnou třískou, což mají především uhlíkové a legované oceli. Proto je K skupina materiálů vhodná pro jemné soustružení tvrzených litin, popřípadě kalených ocelí a lze obrábět běžným, ale i přerušovaným řezem. Pomocí destičky KS6000 je možné obrábění vysokými řeznými rychlostmi a posuvy, a to s pomocí chlazení, ale i bez chlazení.

Workpiece Material	Cast Iron (Gray Cast Iron/Ductile Cast Iron)			
Cutting Range	Finishing	←→		Roughing
Classification	K01	K10	K20	K30
Ceramic	A65			
	A66N			
	KS6000			

Obr. 18: Klasifikace destičky KS6000 od výrobce [14]

1.12.2 Držák destičky

Pro experiment byl vybrán speciální držák, který umožňuje přenášení elektrického signálu svým tělem. Výrobce speciálního držáku je CERADEx a nese označení XCSRNR2525M-1207SEN.

Druh držáku	Způsob upnutí	Tvar destičky	Tvar nože	Úhel hřbetu
X Speciál Speciál	C 	S 	R  75°	 N $\alpha_n = 0^\circ$
Směr řezu	Výška řezu	Šířka držáku	Délka držáku	-
R 	 25	 25	 M 150	-
Velikost hrany	Tloušťka destičky	Tvar destičky	Úhel hřbetu	provedení
12	7	S 	E	N 

Obr. 19: Rozměry držáku [14]

1.13 Obráběný materiál

Jako materiál pro experiment byla vybrána tvárná litina. Vlastnosti tvárné litiny popisují materiálové normy. Dříve se používala norma DIN 1693, kterou ovšem nahradila norma EN 1563.

Tvárná litina má výborné mechanické vlastnosti, díky kterým se oblast použití tvárných litin neustále rozšiřuje. Téměř polovina světové výroby je spotřebována v automobilovém průmyslu. Před uvedením do provozu je nutná ochrana proti korozi.

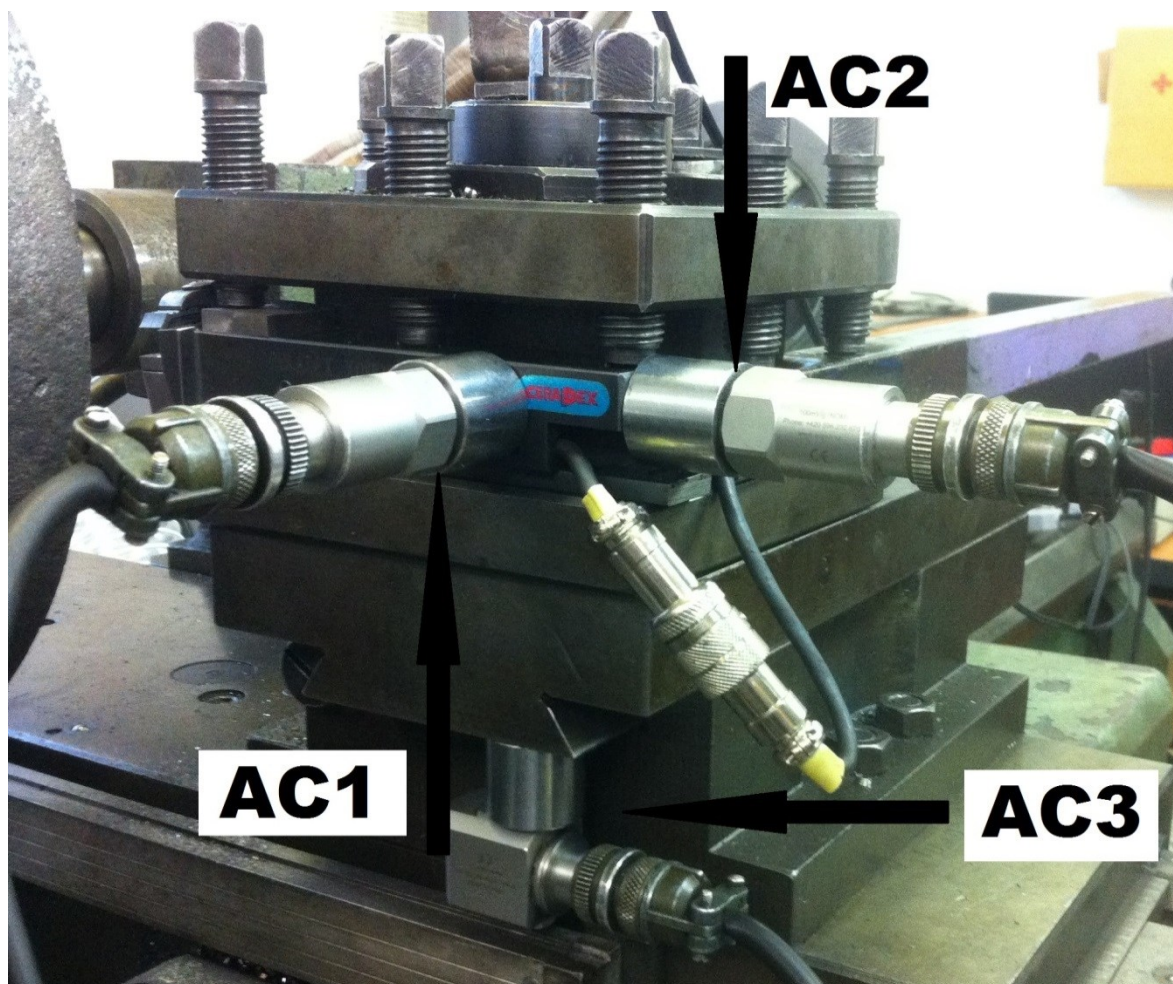
Tab. 3: Vlastnosti obráběného materiálu

DIN 1693	EN 1563	Pevnost v tahu R _m [MPa]	Smluvní mez kluzu R _{p02} [MPa]	Tažnost A [%]
GGG-70	EN-GJS-700-3	700	420	2

2 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

2.1 Příprava experimentu

Před měřením bylo zapotřebí nastavit veškerou potřebnou měřicí techniku. Pro sledování teploty se připojil na speciální držák pyrometr, který byl upnut na nožovou hlavu a nastaven přímo na špičku nástroje. Pro sledování opotřebení nástroje se používal dílenský mikroskop propojený se stolním počítačem. Hodnoty elektrického odporu se měřily pomocí speciální nanesené odporové vrstvy na povrchu destičky, kdy signál elektrického odporu procházel přes speciální držák destičky. Při samotném měření vibrací byly umístěny tři snímače vibrací ve třech různých směrech na nožový držák typu CV11MV a podélný stůl. Snímač AC1 byl umístěn ve směru posuvovém, snímač AC2 ve směru zadní roviny a snímač AC3 ve směru hlavního řezného pohybu. (obr. 20)



Obr. 20: Uložení snímačů na nožové hlavě

Po nastavení měřicí techniky se experiment realizoval pomocí propojení snímačů se zařízením ADASH A4400 – VA4 Pro.

2.2 Realizace experimentu

Před prvním měřením bylo zapotřebí obrobit kůru odlitku, a to z důvodu, aby nedocházelo k přerušovanému řezu. Po odstranění kůry byl naměřen konečný průměr obrobku $D = 293 \text{ mm}$.

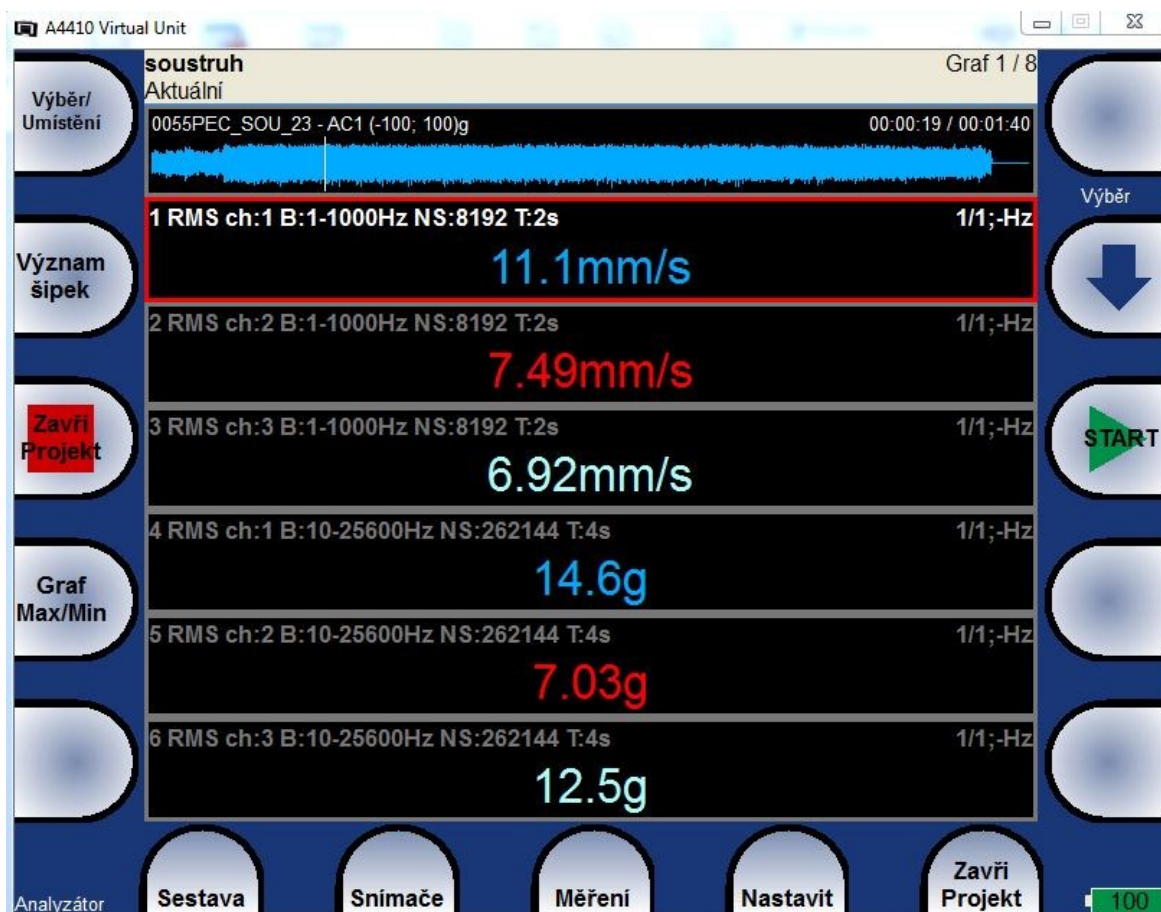


Obr. 21: Obrábění kůry odlitku

Při provádění měření bylo použito celkem 5 břitů s různými parametry obrábění tj. řezná rychlost a velikost posuvu. Hloubka řezu byla konstantní a měla hodnotu $a_p = 1,5 \text{ mm}$. Měření probíhalo takovým způsobem, kdy jednotlivou hranou bylo obráběno ve více úsecích až do úplného opotřebení břitu. Vždy po jednotlivém úseku bylo prováděno měření opotřebení na čele a hřbetu nástroje, a také délka obrábění jednotlivého úseku. Parametry obrábění společně s naměřenými délkami úseků jsou uvedeny v příloze A.

2.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

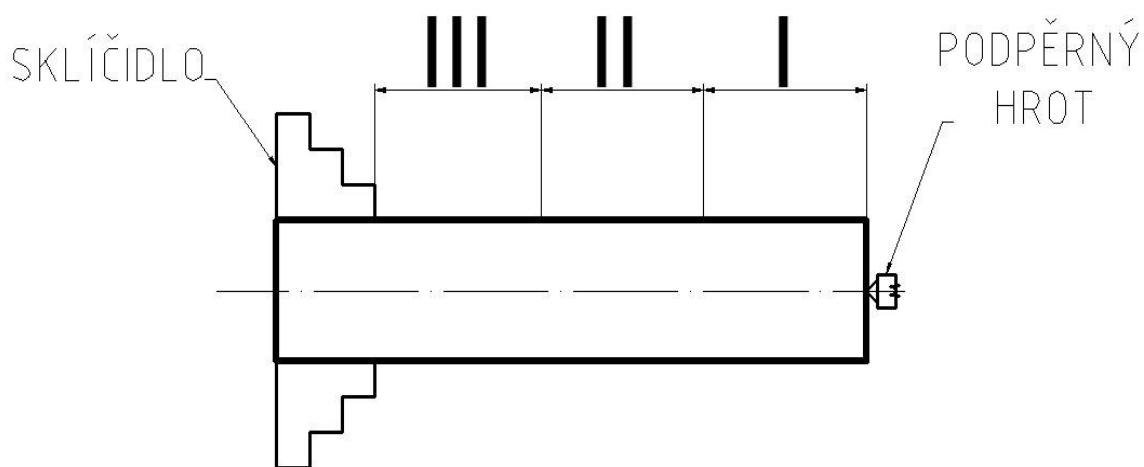
Hodnoty byly měřeny pomocí přístroje **ADASH A4400 - VA4Pro** v prostředí „Záznam“ a po měření se data vyhodnocovala pomocí speciálního softwaru „A4410 Virtual Unit“ v prostředí „Analyzátor“. Výhodou tohoto prostředí je, že můžeme jednotlivé signály neustále opakovaně přehrávat. Měření bylo prováděno a zkoumáno pro všechny tři AC vstupy ve třech směrech.



Obr. 22: Okno analyzačního softwaru

2.4 První část experimentu

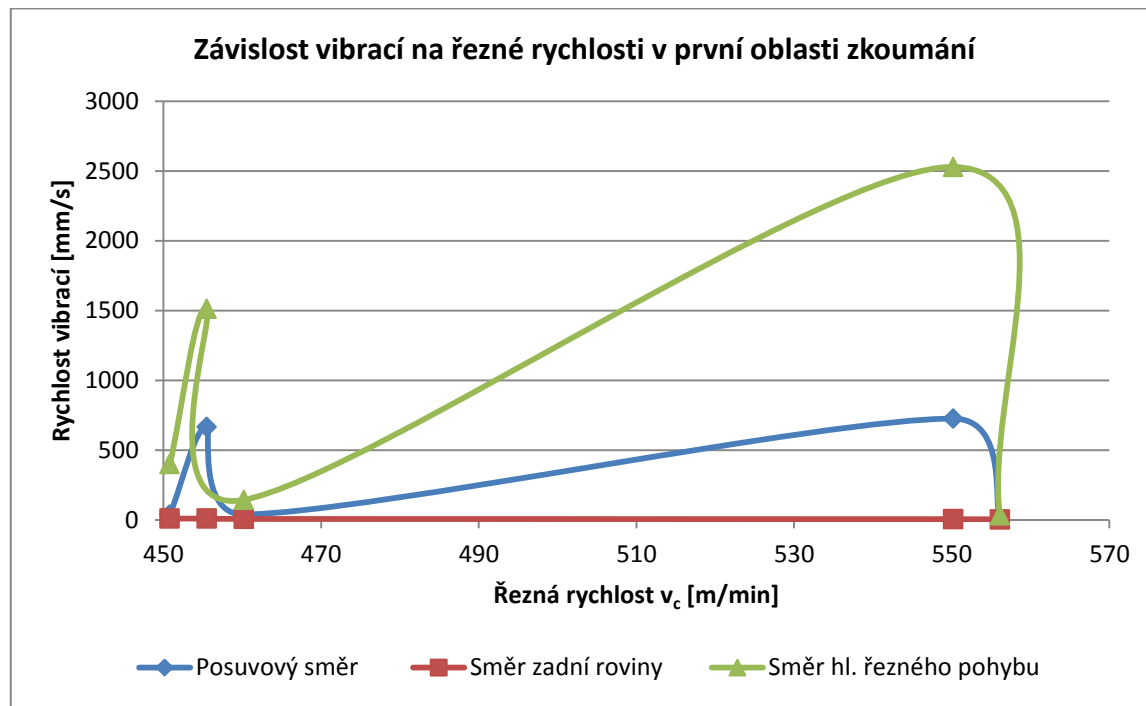
V první části experimentu se zkoumalo, jaký vliv na vibrace může mít vzdálenost obrábění od podpěrného hrotu. Délka obrábění byla rozdělena na tři úseky: v prvním úseku bude probíhat obrábění nejdál od sklíčidla, kde je upnut obrobek. Druhý úsek zkoumání je zvolen přibližně ve středu délky obrábění a třetí úsek je nejbližší ke sklíčidlu, ve kterém je upnut obrobek. (obr. 23) Ve všech třech případech, budeme zkoumat závislost vibrační na odlišných hodnotách řezné rychlosti.



Obr. 23: Rozdělení obráběné délky na jednotlivé úseky

1.) Porovnání hodnot vibrací v závislosti na řezné rychlosti v prvním úseku obrábění.

Experiment na prvním úseku obrábění byl zkoumán pro řezné podmínky: hloubka řezu $a_p=1.5$ mm; velikost posuvu $f=0.1$ mm; řezná rychlost $v_c=450,8 - 556,1$ m/min.



Obr. 24: Grafy vibrací v prvním úseku obrábění

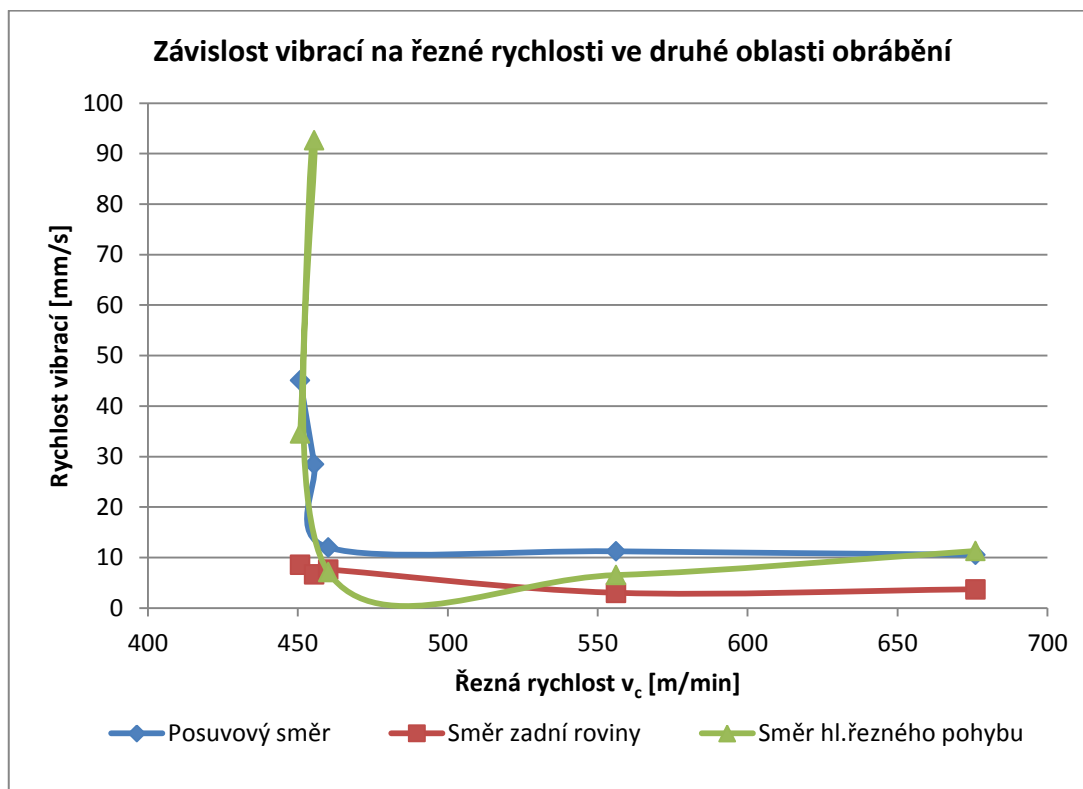
Dle grafu lze názorně vidět, že vibrace jsou nejvýraznější ve směru hlavního řezného pohybu. To může být způsobeno tím, že na směr hlavního řezného pohybu působí nejvíce vlivů, jako jsou např. špatný stav ložisek podpěrného hrotu, ložiska stroje, velikost otáček a mnoho dalších. Střední hodnoty vibrací v prvním úseku dosahují vibrace ve směru posuvovém. Vibrace jsou přímo úměrné s velikostí posuvu a tuhostí dané nožové hlavy. Hodnoty vibrací ve směru zadní roviny mají velmi malé hodnoty. Z důvodu velké rozdílnosti velikosti rychlosti vibrací v daných směrech je detailní průběh vibrací zachycen v příloze B. Rozdílnost jednotlivých velikostí rychlostí vibrací výrazně způsobují složky řezných sil, kdy na každý směr působí složka síly s rozdílnou velikostí.

Při hodnotě cca $v_c=550$ m/min dochází k extrémnímu nárůstu vibrací. Při této hodnotě můžeme říci, že proces je tzv. nestabilní. To je způsobeno tím, že bod stability se přiblížil k určité mezní hodnotě. V našem případě bylo obráběno konstantní hloubkou řezu $a_p=1,5$ mm, z čehož vyplývá, že řešením by byla změna otáček vřetene. Pro potvrzení této teorie by se však musely provést další experimenty.

2.) Porovnání hodnot vibrací v závislosti na řezné rychlosti ve druhé oblasti obrábění.

Experiment ve druhé oblasti obrábění byl zkoumán pro řezné podmínky: hloubka řezu $a_p=1,5\text{ mm}$; velikost posuvu $f=0,1\text{ mm}$; řezná rychlost $v_c = 450,8 - 676\text{ m/min}$

I v druhém úseku obrábění není možnost sledovat detailně průběhy vibrací v daném směru, tudíž jednotlivě průběhy jsou zaznamenány v příloze C.



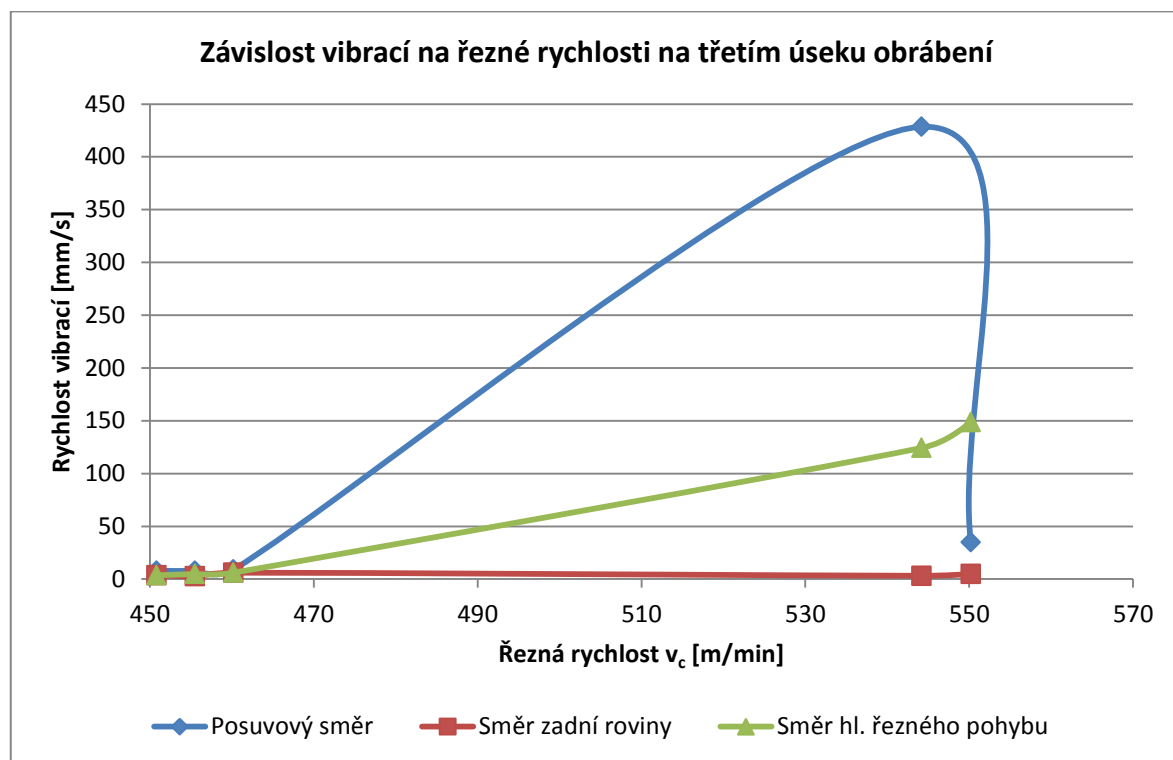
Obr. 25: Grafy vibrací ve druhém úseku obrábění

Z grafů je zřejmé, že hodnoty vibrací ve směru posuvovém a ve směru hlavního řezného pohybu mají téměř totožné hodnoty. Při řezné rychlosti okolo 450 m/min dochází k vibracím nejvýraznějším a při stoupající řezné rychlosti mají klesající tendenci.

Vibrace ve směru zadní roviny, mají nejnižší hodnoty, které mohou být způsobeny především dobrou tuhostí nožové hlavy, a také tím, že na směr zadní roviny působí axiální složka řezné síly, která nabývá nejmenších hodnot. Další vlastností, která pozitivně působí na malé rychlosti vibrací ve směru zadní roviny, mohou být přijatelné vlastnosti obráběného materiálu.

3.) Porovnání hodnot vibrací v závislosti na řezné rychlosti v třetí oblasti obrábění.

Experiment ve třetí oblasti obrábění byl zkoumán pro řezné podmínky: hloubka řezu $a_p=1,5\text{ mm}$; velikost posuvu $f=0,2\text{ mm}$; řezná rychlost $v_c = 450,8 - 550,2\text{ m/min}$

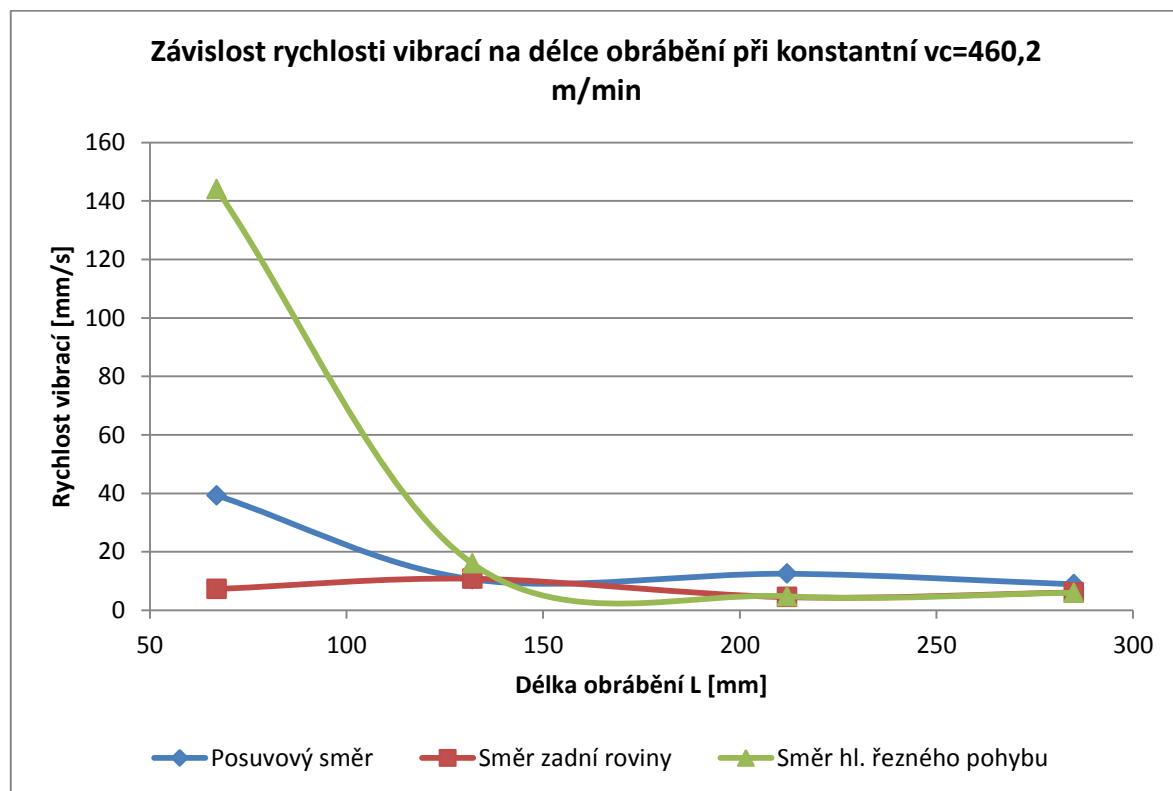


Obr. 26: Grafy vibrací ve třetím úseku obrábění

Ve třetím úseku stojí za zmínku, že v tomto případě nebyly hodnoty vibrací nejvyšší ve směru hlavního řezného pohybu, ale v pohybu posuvovém. To může být důsledkem toho, že u třetího úseku byla zvýšena hodnota posuvu na $f=0,2\text{ mm}$. Při hodnotě řezné rychlosti okolo $v_c=550\text{ m/min}$ jsou vibrace opět vychýleny do nejvyšších hodnot, ale při porovnání s prvním úsekem obrábění mají vibrace výrazně menší rychlost. Detailní průběhy rychlostí vibrací v jednotlivých směrech třetího úseku obrábění opět nalezneme v příloze D.

2.5 Druhá část experimentu

Na druhou část experimentu byla vybrána jedna řezná rychlost, při které se obrobila celá délka obrobku, než se destička opotřebila. Pro experiment byly zvoleny otáčky $n=500 \text{ min}^{-1}$ a velikost posuvu $f=0,1 \text{ mm}$.



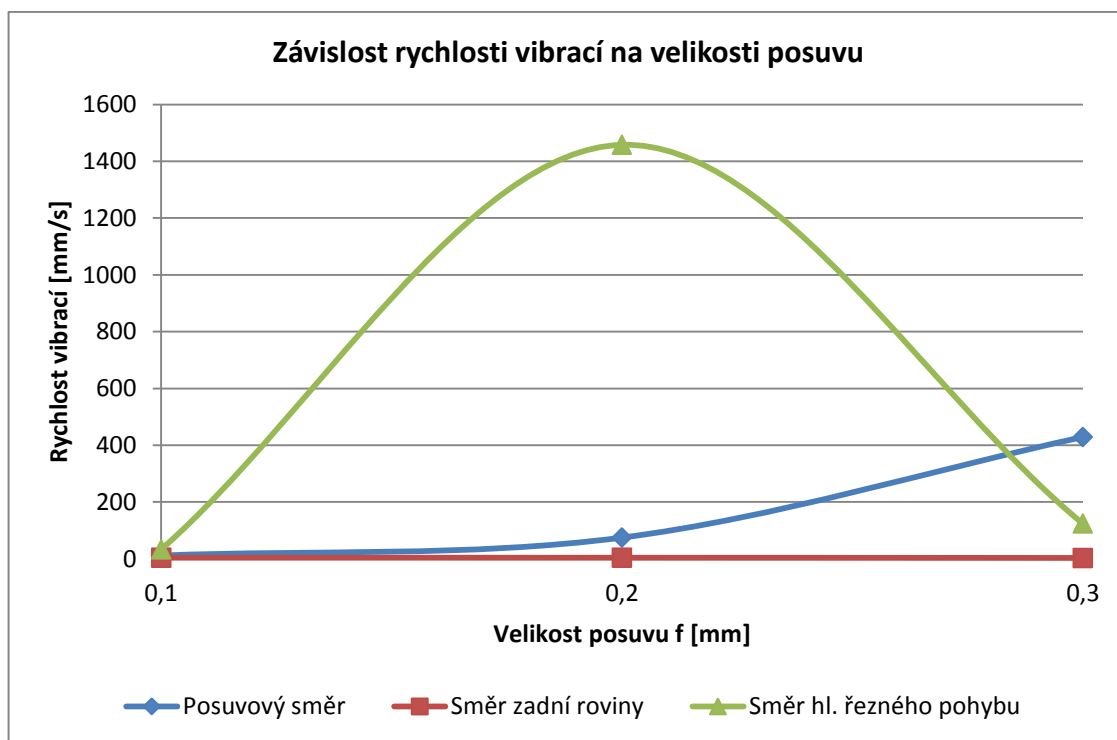
Obr. 27: Graf závislosti rychlostí vibrací na délce obrábění

Z grafu lze vidět, že na rychlost vibrací má zásadní vliv vzdálenost obrábění od podpěrného hrotu. Blíže koníku jsou vibrace výraznější. Čím dále se obrábí od podpěrného hrotu, tím je rychlost vibrací klesající, což může znamenat špatný stav ložisek koníku. Dalším faktorem, který může ovlivňovat tuto teorii, může být velikost vysunutí pinoly koníku.

Při ostatních měření se postupovalo tak, že při otupení břitové destičky se vyměnil břit nástroje a pokračovalo se v obrábění daného průměru. To znamená, že jedna délka obráběného průměru byla obráběna více řeznými rychlostmi.

2.6 Třetí část experimentu

Ve třetí části experimentu byla zkoumána závislost velikosti posuvu na vibrace tím, že byly porovnávány tři různé hodnoty posuvů při prvním záběru břitové destičky do materiálu, kdy břitová destička začíná obrábět s opotřebením $VB=0$. Hodnoty řezné rychlosti byly zvoleny $v_c=550 \pm 5$ m/min.



Obr. 28: Graf závislosti rychlosti vibrací na velikost posuvu

Z grafů lze názorně vidět, že ve směru posuvovém je značný nárůst rychlosti vibrací v závislosti s rostoucí velikostí posuvu. Rychlost vibrací ve směru zadní roviny mají velmi malé hodnoty a téměř lineární průběh, to znamená, že velikost posuvu nemá zásadní vliv pro nárůst rychlosti vibrací ve směru zadní roviny.

3 ZÁVĚR

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku ohledně sledování vlivu vibrací na obráběcí proces. Nejdříve je popsán teoretický rozbor vibrodiagnostiky, základní principy měření, detailně je popsán měřicí přístroj i s dalšími komponenty nutnými k provedení experimentu. V práci je také popsáno na jakém stroji se experiment prováděl, jaký nástroj byl použit k experimentu, ale i samotný obráběný materiál. Po teoretické části je popsáno zpracování naměřených hodnot a samotné vyhodnocení experimentu.

Samotný experiment probíhal způsobem, kdy jednou hranou břitové destičky se obrábělo ve více úsecích až do úplného opotřebení hrany destičky. Po otupení hrany destičky se pokračovalo v obrábění daného průměru novou neopotřebovanou hranou. Snímače vibrací byly propojeny se speciálním přístrojem a rychlosti vibrací se zaznamenávaly v modulu „Záznam“. Při výměně hrany břitové destičky docházelo záměrně ke změně řezné rychlosti a to pomocí změny otáček, nebo změnou velikosti posuvu. Hloubka záběru byla konstantní a měla hodnotu $a_p=1,5$ mm.

První část praktického experimentu se zabývala vlivem vzdálenosti obrábění od podpěrného hrotu. Obráběná délka obrobku byla rozdělena na tři úseky, ve kterých se zkoumaly rychlosti vibrací. V prvním úseku byly vibrace nejvýraznější ve směru hlavního řezného pohybu, střední hodnoty nabývaly rychlosti ve směru posuvovém a ve směru zadní roviny byly vibrace nejnižší. Je také nutné zdůraznit, že na směr hlavního řezného pohybu působí axiální složka řezné síly, která nabývá největších hodnot, kdežto na posuvový směr působí radiální složka řezné síly, která je v určitém poměru menší než složka axiální. Ve druhém úseku se vibrace ve směru posuvovém shodují s hodnotami ve směru hlavního řezného pohybu a vibrace ve směru zadní roviny dosahují opět nejnižších hodnot. Třetí úsek je specifický tím, že ve směru posuvovém jsou hodnoty rychlostí vibrací vyšší, než u směru hlavního řezného pohybu, což je způsobeno zvětšením velikosti posuvu f .

Ve druhé části praktického experimentu byly vybrány řezné podmínky, při kterých se obrobila celá obráběná délka obrobku. Dle grafů lze vidět závislost délky obrábění na rychlosti vibrací, kdy čím větší je vzdálenost obrábění od podpěrného hrotu, tím mají vibrace klesající hodnoty.

Ve třetí části praktického experimentu byla zkoumána závislost velikosti posuvu na rychlosti vibrací. Z grafů je zřejmé, že velikost posuvu je přímo úměrná s vibracemi ve směru posuvovém, kdy při zvyšování velikosti posuvu vibrace mají rostoucí tendenci.

4 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VLACH, B. a kol. Technologie obrábění a montáží. Praha : SNTL, 1990. ISBN 80-03-00413-09.
- [2] HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II.: Vibrodiagnostika*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [3] RUDOLF, Brepta, LADISLAV, Pust, FRANTIŠEK, Turek. *Mechanické kmitání: Technický průvodce*. 1. vyd. [s.l.] : SOBOTÁLES, 1994. 592 s. ISBN 80-901684-8-5.
- [4] KOCMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [5] FOJTŮ, Petr. *Problematika samobuzeného kmitání při obrábění*. ČVUT [online]. 2009, 15 s. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/History/2009/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>.
- [6] YAO, Zhehe, MEI, Deqing, CHEN, Zichen. *On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine*. China. 2009.[online]. 7s. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609004063>
- [7] TLUSTÝ, J. *Manufacturing processes and equipment*. New York: Prentice Hall, 1999. 928 s.
- [8] TUMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika s.r.o., 1997. 174s. Neprošlo redakční ani jazykovou úpravou. ISBN 80-901936-1-7.
- [9] SUCHÁČEK, R. *Regenerativní kmitání při soustružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Fiala.

- [10] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jakou součástí týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika* [online]. 2012 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/BilosovaVIBDI_skripta.pdf
- [11] Adash spol. s r.o. *A4400 - VA4 Pro. ADASH*[on-line], [cit. 2014-05-15]. Dostupný z: http://www.adash.cz/doc/a4400/A4400_VA4_CZ.pdf
- [12] Connection Technology Center, INC. [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: [https://www.ctconline.com/___100_mv_g_accelerometer___standard_size_\(most_common\).aspx](https://www.ctconline.com/___100_mv_g_accelerometer___standard_size_(most_common).aspx)
- [13] SCHREIER, V. *Sledování vlivu vibrací na obráběcí proces: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní, katedra obrábění a montáže, 2013, 60 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.
- [14] Electronic catalog [online]. Vancouver: Kyocera industrial corp., 2011. Dostupné z: http://americas.kyocera.com/kicc/pdf/ceramics_brochure.pdf

5 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Volené a naměřené hodnoty

Příloha B – Průběhy vibrací jednotlivých směrů v prvním úseku obrábění

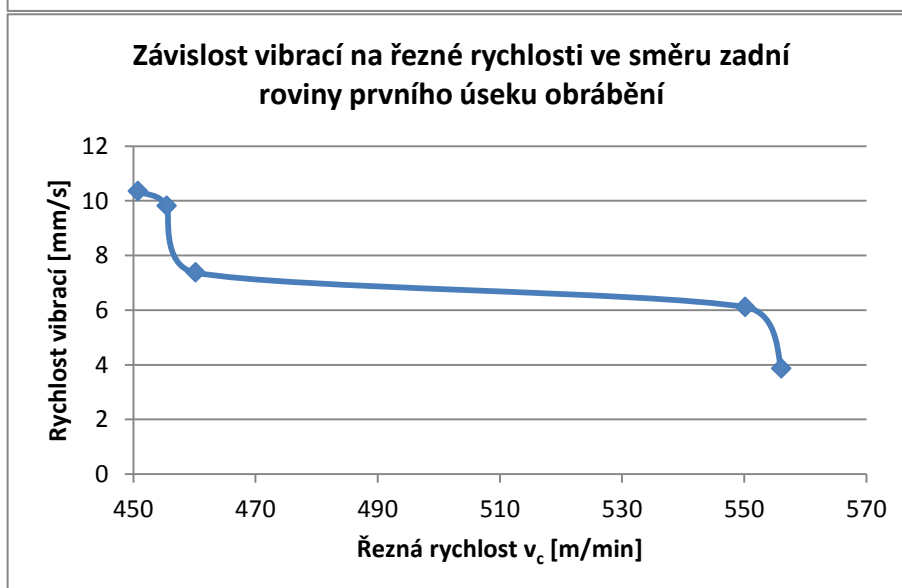
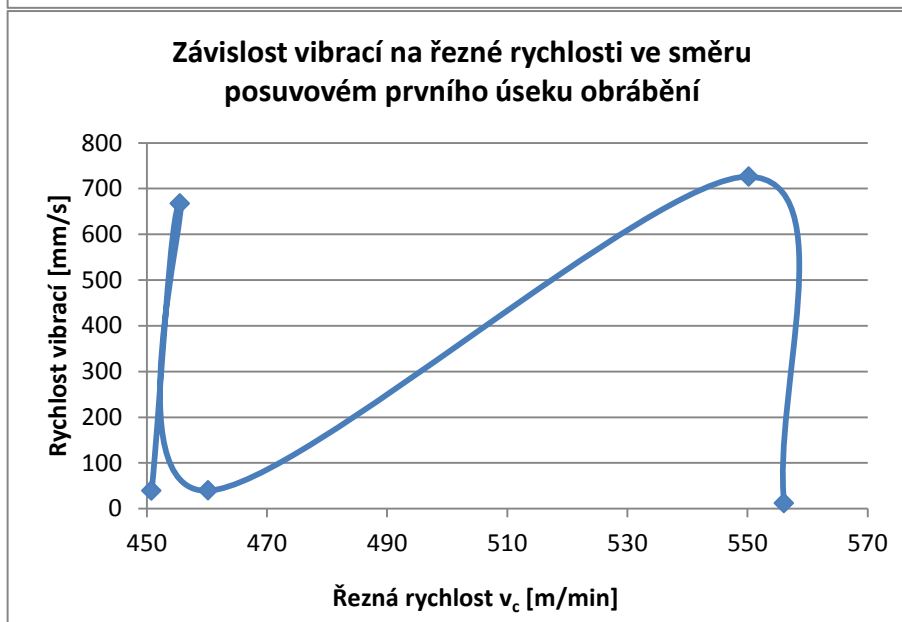
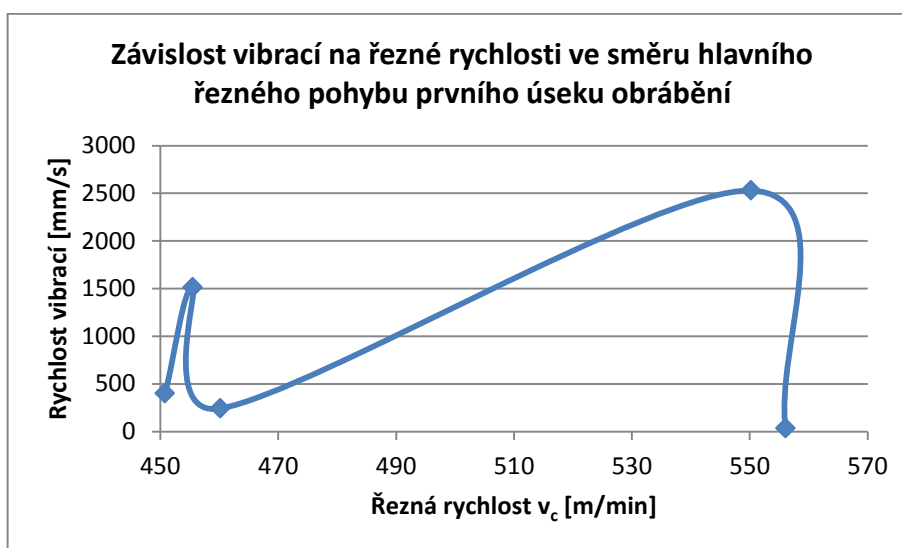
Příloha C – Průběhy vibrací jednotlivých směrů ve druhém úseku obrábění

Příloha D – Průběhy vibrací jednotlivých směrů ve třetím úseku obrábění

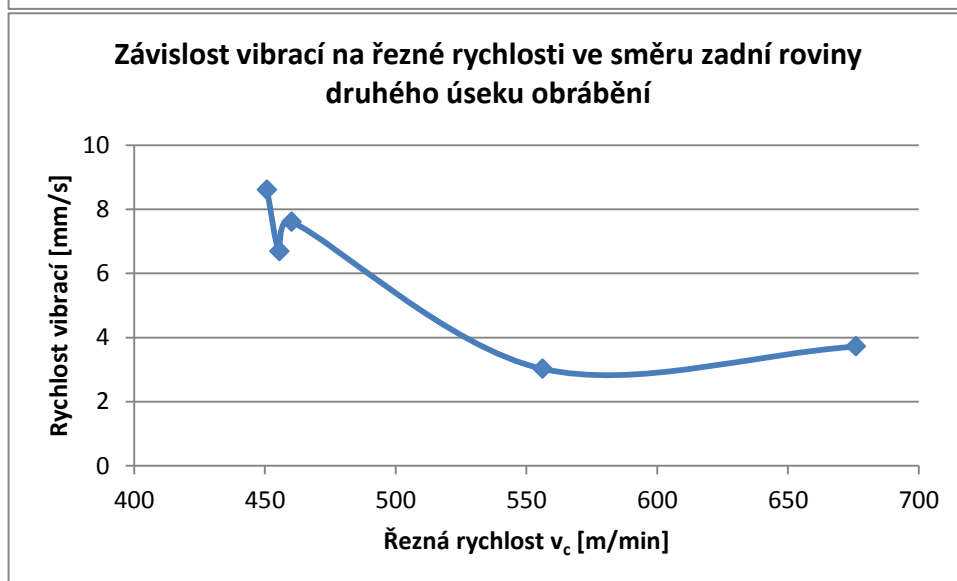
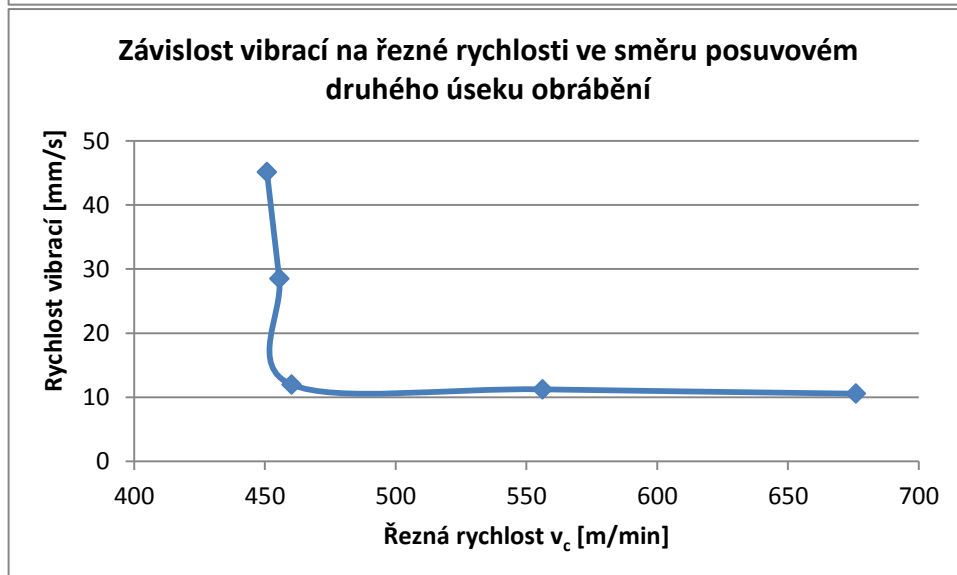
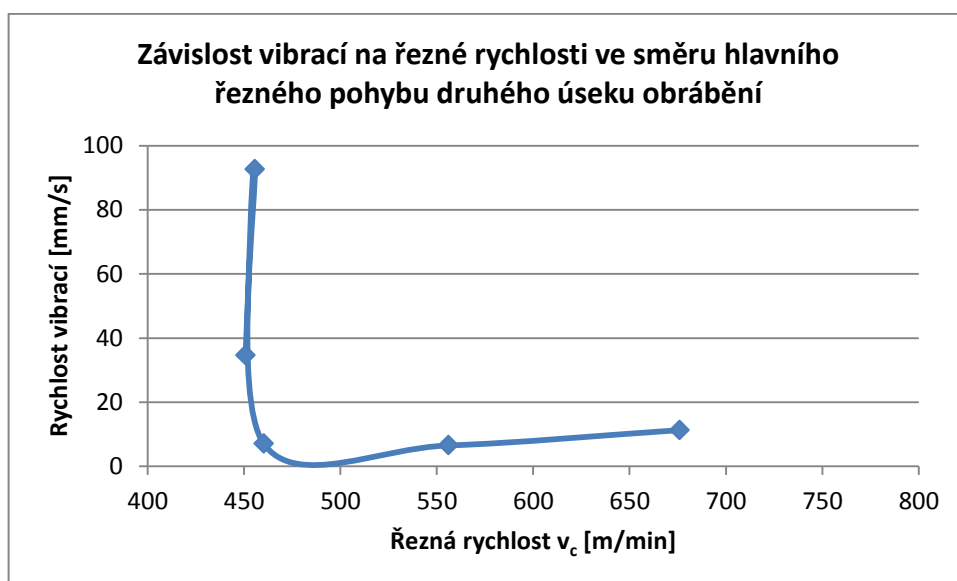
Příloha A – Volené a naměřené hodnoty

Břit č. 1	f [mm]	n[1/ot]	a_p[mm]	d[mm]	Lo[mm]	L[mm]	Lc[mm]	v_c[m/min]
měření č.20	0,1	500	1,5	293	0	67,5	67,5	460,2
měření č.21	0,1	500	1,5	293	67,5	132	64,5	460,2
měření č.22	0,1	500	1,5	293	132	212	80	460,2
měření č.23	0,1	500	1,5	293	212	285	73	460,2
měření č.24	0,1	500	1,5	290	0	68	68	455,5
měření č.25	0,1	500	1,5	290	68	145	77	455,5
měření č.26	0,1	500	1,5	290	145	285	140	455,5
měření č.27	0,1	500	1,5	287	0	140	140	450,8
měření č.28	0,1	500	1,5	287	140	280	140	450,8
měření č.29	0,1	500	1,5	284	0	138	138	446,1
Břit č. 3	f [mm]	n[1/ot]	a_p[mm]	d[mm]	Lo[mm]	L[mm]	Lc[mm]	v_c[m/min]
měření č.40	0,1	630	1,5	281	0	30	30	556,1
měření č.41	0,1	630	1,5	281	30	50	20	556,1
měření č.42	0,1	630	1,5	281	50	80	30	556,1
měření č.43	0,1	630	1,5	281	80	105	25	556,1
měření č.44	0,1	630	1,5	281	105	150	45	556,1
Břit č. 4	f [mm]	n[1/ot]	a_p[mm]	d[mm]	Lo[mm]	L[mm]	Lc[mm]	v_c[m/min]
měření č.50	0,2	630	1,5	281	150	180	30	556,1
měření č.51	0,2	630	1,5	281	180	230	50	556,1
měření č.52	0,2	630	1,5	281	230	280	50	556,1
měření č.53	0,2	630	1,5	278	0	30	30	550,2
Břit č. 5	f [mm]	n[1/ot]	a_p[mm]	d[mm]	Lo[mm]	L[mm]	Lc[mm]	v_c[m/min]
měření č.60	0,3	630	1,5	278	30	60	30	550,2
měření č.61	0,3	630	1,5	278	60	85	25	550,2
měření č.62	0,3	630	1,5	278	85	115	30	550,2
měření č.63	0,3	630	1,5	278	115	150	35	550,2
měření č.64	0,3	630	1,5	278	150	185	35	550,2
měření č.65	0,3	630	1,5	278	185	225	40	550,2
měření č.66	0,3	630	1,5	278	225	280	55	550,2
měření č.67	0,3	630	1,5	275	0	55	55	544,2
Břit č. 6	f [mm]	n[1/ot]	a_p[mm]	d[mm]	Lo[mm]	L[mm]	Lc[mm]	v_c[m/min]
měření č.70	0,1	800	1,5	275	55	90	35	691,1
měření č.71	0,1	800	1,5	275	90	135	45	691,1

Příloha B - Průběhy vibrací jednotlivých směrů v prvním úseku obrábění



Příloha C: Průběhy vibrací jednotlivých směrů ve druhém úseku obrábění



Příloha D: Průběhy vibrací jednotlivých směrů ve třetím úseku obrábění

